

# Über Windkanäle in Rumänien

Von Victor Valcovici und I. Stroescu

vorgelegt von V. Valcovici

Das Aerodynamische Institut von Rumänien (Institutul de Aerodinamica) hat sich vorgenommen, eine aerodynamische Versuchsanstalt in Rumänien für vorwiegend wissenschaftliche Zwecke zu bauen. Der schon seit 1931 in Bukarest fertiggestellte Windkanal gehört der Technischen Hochschule und dient hauptsächlich zu Unterrichtszwecken. Er gehört zu dem Typus des geschlossenen Kanals und besitzt im Versuchsraum einen Kreisquerschnitt mit 1,5 m Durchmesser. Dagegen wird der vom Aerodynamischen Institut geplante Windkanal durch einen freien Strahl mit elliptischem, 33 m<sup>2</sup> Flächeninhalt besitzendem Querschnitt gekennzeichnet sein. Die beiden Hauptachsen des elliptischen Querschnitts werden

$$2a = 7,238 \text{ m}; 2b = 5,798 \text{ m} \quad (1)$$

betragen.

Der freie Strahl wird aus einer Düse herauskommen, hinter der Meßstrecke in einem Trichter aufgefangen und weiter dem Ventilator zugeführt. Die Luft wird nachher halb links, halb rechts zurückkehren. Die Luftgeschwindigkeit im Strahl soll etwa 40 m/sec beim atmosphärischen Druck sein. Die Länge des freien Strahls soll entweder

$$l = 2b \text{ oder } l = \frac{5}{3} 2b$$

d. h. entweder 5,798 m oder 9,66 m betragen. Die festgebaute Länge wird die größere sein, so daß man die kleinere Länge mittels eines verschiebbaren Stücks herstellen kann.

Zu den oben angegebenen Zahlen sind wir im wesentlichen durch theoretische Überlegungen gelangt.

Wir haben unsere Aufmerksamkeit stets auf die Ähnlichkeitsbedingungen konzentriert, da wir uns vor Augen hielten, daß die Ergebnisse im Windkanal eine praktische Anwendung in der Originalgröße finden sollen. Das bedeutet, daß wir womöglich dieselbe Reynoldssche Zahl in beiden Fällen haben müssen. Da wir aber fast ausschließlich mit derselben Luft und mit derselben kinematischen Zähigkeit sowohl im Windkanal als auch in der freien Luft zu tun haben, so kommt die Gleichheit der Reynoldsschen Zahlen lediglich auf die Gleichheit der Kennwerte  $E$  hinaus.

1. Bemerkung: Bei konstantem Kennwert  $E$  wird die nützliche Leistung

$$L = \frac{1}{2} \rho F w^3 \quad (2)$$

( $\rho$  = Dichte der Luft,  $F$  = Querschnittsfläche des Strahls,  $w$  = Luftgeschwindigkeit) umgekehrt proportional dem mittleren Durchmesser  $D$  des Strahlquerschnitts ausfallen:

$$L \cdot D = \text{Konst.} \quad D \propto \frac{1}{L} \quad (3)$$

Die Geschwindigkeit  $w$  ist ebenfalls umgekehrt proportional dem mittleren Durchmesser  $D$ .

2. Bemerkung: Wenn man die die Werte von  $q_a$  und  $q_w$  darstellenden Kurven als Funktionen vom Kennwert  $E$  betrachtet (Abbildung 1), so sieht man, daß das Gebiet  $E < 15$  zu großen Differentialquotienten, dagegen das Gebiet  $E > 20$  bedeutend kleineren entspricht. Dabei bedeuten  $q_a$  und  $q_w$  den maximalen Auftriebs- bzw. minimalen Widerstandsbeiwert der verschiedenen auf der Figur angegebenen Flügel. Daraus kann man folgern, daß die im Gebiet  $E < 15$  vor sich gehenden Versuche weniger zuverlässig als die sich im Gebiet  $E > 20$  befindlichen sind (ceteris paribus) da ja die einer kleinen Veränderung von  $E$  entsprechende Variation der aerodynamischen Parameter bedeutend kleiner im Gebiet  $E > 20$  als

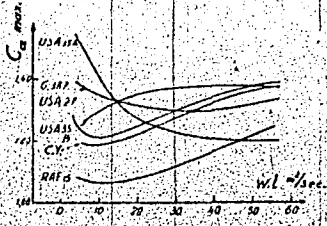
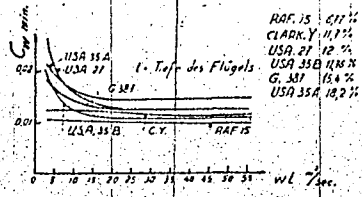


Abb. 1

im Gebiet  $E = 15$  ausfällt. Aus diesem Grunde ist es empfehlenswert, möglichst im Gebiet  $E = 20$  zu arbeiten. Die Bedingung  $k = 20$  kann man vielleicht als eine Stabilitätsbedingung der Versuchsanordnung bezeichnen. Nehmen wir nun an, daß die Tiefe  $t$  des Flügels gleich einem Fünftel seiner Länge und die Länge selbst höchstens  $0,05 \cdot 2a$  ist, so hat man für die obere Grenze  $t'$  der Tiefe:

$$t' = 0,13 \cdot 2a; \quad t \leq t'$$

Der Kennwert  $E$  wird dementsprechend eine obere Grenze  $E'$

$$E' = 0,13 \cdot 2a \cdot v$$

haben. Diese Formeln werden in unserem speziellen Falle liefern:

$$t' = 0,911; \quad E' = 37,64 \text{ m}^2/\text{sec.} \quad (6)$$

d. h. wir befinden uns für den geplanten Windkanal in einem Gebiet der kleinen Differentialquotienten (Abbildung 1), wo also die Stabilitätsbedingung der Versuchsanordnung erfüllt ist. In der folgenden Tabelle sind die Kennwerte  $E$  und die Reynoldsschen Zahlen  $R$  für einige Windkanäle angegeben.

	$D_{max}$ m	$v_{max}$ m/sec	$E$ m <sup>2</sup> /sec	$R \cdot 10^{-6}$
Langley-Field .....	18,3	55	1,90	9,1
Chalais-Mendon .....	16,0	50	1,91	7,3
Adlershof .....	8,0	70	7,3	5,1
Barnborough .....	7,3	51	18	3,4
Moskau .....	3,0	101	10	2,8
Langley-Field .....	6,1	50	10	2,8
Bukarest (Institut) .....	7,0	40	18	2,5
Pasadenä .....	3,05	87	31	2,1
Issy-les-Moulineaux .....	3,0	80	31	2,2
Moskau .....	6,0	30	23	1,6
Zürich .....	3,0	50	19	1,3
Göttingen .....	2,21	58	17	1,2
Rom .....	1,6	80	17	1,2
Teddington (N.P.L.) .....	1,2	30	16	1,1
Lille .....	2,25	50	15	1,0
Aachen .....	1,85	50	12	0,8
Bukarest (T.H.) .....	1,5	47	9	0,6
Paris (Eiffel) .....	2,0	32	8	0,5
Wien .....	1,5	22	4	0,3

Tab.

$$E = 0,13 \cdot D \cdot v \text{ m}^2/\text{sec.}$$

3. Bemerkung. Bezeichnet man jetzt mit  $L_1$  die nützliche Leistung des Windkanals im Falle eines Kreisquerschnitts und mit  $L_2$  die im Falle eines elliptischen Strahlquerschnitts gleichen Inhalts, so hat man

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{1}{1 + \frac{b^2}{a^2}}$$

d. h. wenn man von dem kreisförmigen zu dem elliptischen Strahlquerschnitt gleichen Inhalts übergeht, so hat man eine prozentuale Verminderung der Leistung, die durch Formel (7) angegeben ist. Wendet man dieses Resultat auf unseren Fall an, so erhält man eine Verminderung von 28% der Leistung, d. h. man spart 28% an Energie, wenn man vom kreisförmigen zum elliptischen Querschnitt übergeht.

4. Bemerkung. Um genaueres über die Ausführungsform der Luft rückkehrwände zu gewinnen, haben wir ein Modell (Abbildung 2) der ganzen Einrichtung im Verhältnis  $1/15$  zum wirklichen Kanal gebaut. Die

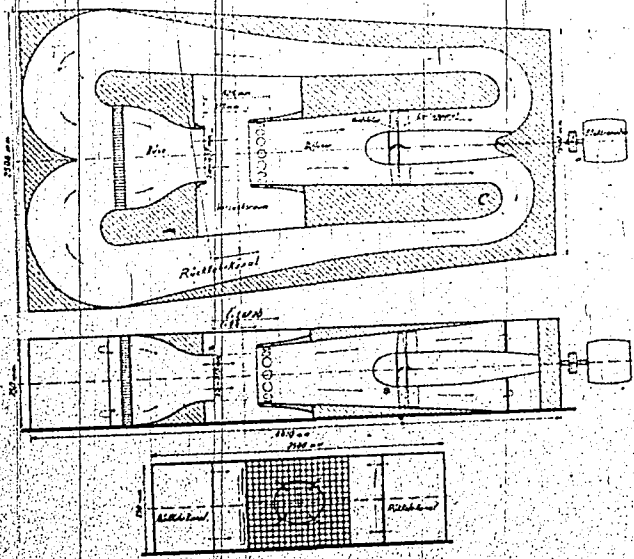


Abb. 2

Umbiegung der Luft um  $180^\circ$  nach dem Ventilator und an entgegen-  
 gesetzten Ende des Modells verläuft ohne Lenkschaufeln. Trotzdem  
 erhielten wir eine gleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeit nicht  
 nur in der Versuchsstrecke (Abbildung 3) und 11, sondern auch im Rück-

Abb. 3

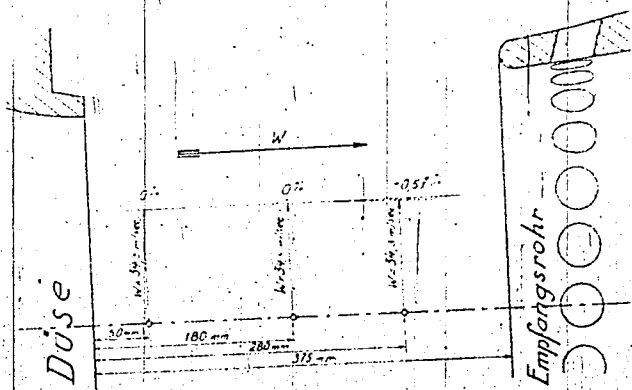


Abb. 4

kehrkanal. Im Falle 1 (Abbildung 5) bemerkt man eine Ablösung der  
 Grenzschicht bei ungefähr  $80^\circ$ . Im Falle 2 mit parallelen Wänden wird  
 die Ablösungstelle weiter verschoben ( $170^\circ$ ). Im Falle 3 haben wir eine  
 Verengung des Kanals versucht. Dadurch ist die turbulente Grenzschicht

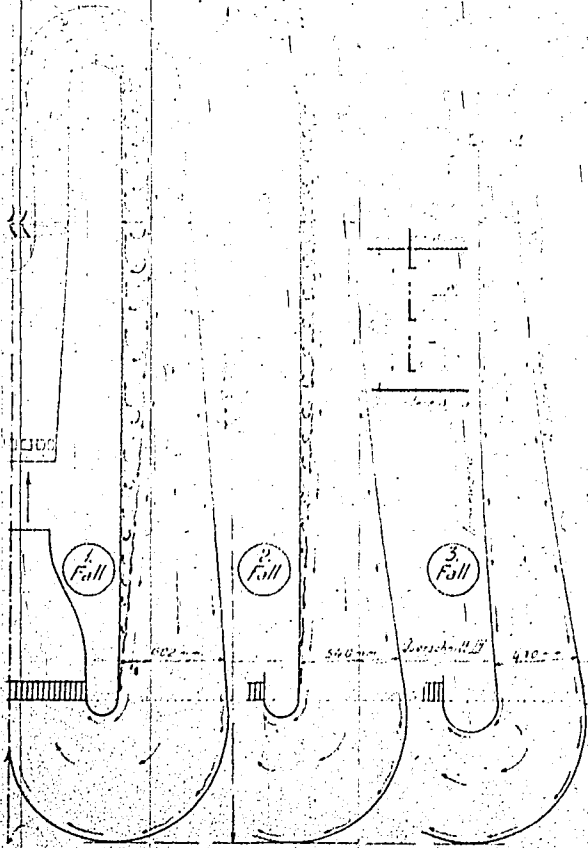


Abb. 5

man die Abhängigkeit von dem prozentualen Überdruck  $\Delta p$  der Geschwindigkeit betrachtet:

im Falle 1	$\Delta p$	13,4 %
im Falle 2	$\Delta p$	26,8 %
im Falle 3	$\Delta p$	30,5 %

so daß also beim Übergang vom Fall 1 zum Fall 3 eine prozentuale Verbesserung der Leistung um ungefähr 3,3 % eintritt.

5. Bemerkung. Der Leistungsgrad des Modells, d. h. Nutzleistung in der Versuchsstrecke: Aufgewandte Leistung beläuft sich auf 1,97. Es ist aber zu erwarten, daß der Leistungsgrad des wirklichen Windkanals etwa zweimal so groß oder gar größer ausfallen wird. Es ist also nicht übertrieben, wenn wir den Leistungsgrad gleich 3 annehmen. In diesem Fall würde die aufgewandte Leistung des Motors für eine Geschwindigkeit von 40 m/sec etwa 650 PS für den wirklichen Windkanal betragen. Wäre der Leistungsgrad nur 2,5, so müßten wir etwa 700 PS Leistung aufwenden.

Bringt man die in der 3. und 4. Bemerkung erwähnten Vorteile der Leistungsberechnung zusammen, so wäre man berechtigt zu behaupten, daß der geplante Windkanal eine Ersparnis an aufgewandter Leistung von grob gerechnet über 30 % im Vergleich mit einem kreisförmigen, mit Lenkschaufeln versehenen Windkanal bei gleichem Kennwert aufweisen wird. Sollte jener einen Motor von 700 PS benötigen, so müßte dieser einen von mindestens 1000 PS besitzen.

---

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung  
vorgelesen am 4. Dezember 1942

## Aussprache

Präsident: Ich denke, Herr Valcovici hat seine Ausführungen in der Hauptsache mit dem besten Willen gemacht und sich bei den verschiedenen Ausführungen wohl um weitere Klärung der Entscheidung in dieser Zeit bemüht zu haben. Auch die Erwartungen waren wohl mehr nach dem Neuen und dem Vorhergehenden zu erwarten. Herr Betz zeigt sich aber nicht in der Richtung des neuen Verständnisses, sondern eine neue Art der Rückführung verläßt das Modell, in dem die Umlenkung des Bauteils verläßt ist. Es wird sehr interessant sein zu sehen, wie die Umlenkung wird. Es ist ja von dem Prinzip her nicht zu erwarten, daß die Umlenkung durch den Druckanstieg verhindert, sondern schon in der Krümmung herumgeführt wird, so daß der Druckanstieg auf der Innenseite beim Übergang in die Gerade vermieden wird. In dem schlanken Teil kann man dann wieder ohne Schaden auf den großen Querschnitt gehen. Dies entspricht jedenfalls einen Teil der Bauart, die bei Ausführung von außen angefertigten Umlenkungsschalen nicht gering ist. (Wenn man diese nämlich nicht probiert macht, dann hat man schon Ärger damit, daß man durch die ungenaue Art der Aufstellung der Umlenkungsschalen gerade wieder Ungleichförmigkeiten bekommt.) Das ist hier alles mit einem Schlag erledigt, und ich hoffe sehr, daß das, was sich am Modell schon so überzeugend erwiesen hat, daß dieses System gut ist, auch bei der großen Ausführung ja nun zu Werk ist, auch sein wird. Jedenfalls möchte ich Ihnen für diese Ausführungen sehr danken. Ihre theoretischen Überlegungen bedürfen ja wohl keiner Diskussion; das war alles so klar, daß man kann etwas dazu zu sagen hätte. Ich habe mir im stillen gedacht, daß man Ihre Methode, Formeln zu projizieren und die Formeln zu nummerieren und im Text zu sagen, welche Formelzeilen man gerade anzuwenden hat, etwas ist, was wir uns selbst auch angewöhnen könnten. Es ist durchaus angenehm zuzuhören, wenn man hört, sich spreche jetzt von Formelzeile 5. Ich möchte jedenfalls diese Form bei unseren Vorträgen zur Nachahmung empfehlen. Also herzlichen Dank für Ihre Ausführungen.

Betz: Die Anlage hat mich sehr interessiert, weil ich früher auch einmal versucht habe, eine Umlenkung ohne Umlenkungsschalen durchzuführen und dabei viel unerwarteten Kummer erlebte. Obwohl ich auch in der Krümmung eine Verengung anwandte, bekam ich doch auf der Innenseite eine ganz unerwartet dicke Reibungsschicht, die den darauffolgenden Diffusor dann sehr in seiner Wirksamkeit störte. Als Grund für diese Erscheinung habe ich mir damals folgendes überlegt: In der Krümmung gehen durch Wirkung der Zentrifugalkraft alle schnellen Teile nach außen und alle langsamen nach innen, so daß sich die letztgenannten auf der Innenseite ansammeln und eine dicke Reibungsschicht bilden. Bei der Anlage, die uns Herr Valcovici gezeigt hat, sind die Folgen dieser dicken Reibungsschicht auf der Innenseite, wie mir scheint, dadurch vermieden, daß durch den Übergang von dem sich verengenden in einen sich erweiternden Teil eine Krümmung im entgegengesetzten Sinn entstanden ist. Infolge dieser Gegenkrümmung wandern die langsamen Teile von der Wand weg und verteilen sich wieder gleichmäßig über den Querschnitt. Wenn jetzt in dem erweiterten Teil ein Druckanstieg erfolgt, dann sitzen die langsamen Teile nicht mehr konzentriert an der Wand und stören daher auch die Diffusorwirkung nicht mehr. Ich glaube, das ist der wesentliche Punkt, warum diese Anordnung so überraschend gut geht.



Peters: Als Ergänzung möchte ich noch einige Zahlenwerte nennen. Die Krümmung mit 130° ist geschätzte Druckverluste je nach dem Radius der Krümmung von 1 bis 1,5 mal dem Staudruck. Wenn man nun in der Krümmung ablenkt, selbst bei verhältnismäßig schwacher Verdrehung, kann man auf den üblichen Wert des Staudrucks herunterkommen. Die Verluste weiter zu drücken war selbst bei größerer Verdrehung nicht möglich. Der Grund dafür kann in dem anschließenden geraden Rohrstück gesucht werden, in dem sich leicht eine Ablösung ergeben kann. Diese Ablösung läßt sich durch die Grenzkrümmung im anschließenden Rohrstück wahrscheinlich vermeiden, so daß es möglich ist, die Verluste noch weiter als 0,5 vom Staudruck zu reduzieren. Damit kommt man sehr nahe an die Druckverluste heran, die bei Anwendung von Umlenktafeln Werte von 0,5 bis herunter auf 0,12 des Staudrucks ergeben.

Prandtl: Wohl für einen rechten Winkel. Hier sind es zwei rechte Winkel.

Peters: Das würde das Doppelte ergeben. Also kommt man durch die Gegenkrümmung vielleicht noch etwas weiter und erreicht tatsächlich die Größenordnungen, die den Umlenktafeln entsprechen.

Prandtl: Ja, darf ich fragen, haben Sie an dem Modell Messungen über den Energieverlust gemacht? Man braucht ja nur den Gesamtdruck mit dem Staurohr vor und hinter dem Krümmer zu messen.

Válcovici: Selbstverständlich.

Prandtl: Und wieviel haben Sie da erhalten, etwa auf Windkanalgeschwindigkeit oder Windkanalstaudruck bezogen?

Válcovici: Die Windkanalgeschwindigkeit im Strahle wurde gemessen und da habe ich folgende Zahlen erhalten: Der Fall 1, wo die Grenzschicht vorhanden ist, wurde mit dem Fall 3 verglichen. Wir haben angenommen, daß der Fall 1 ungefähr dieselbe Grenzschicht wie der Fall 1 mit Lenktafeln aufweist. Denn die Lenktafeln bewirken eigentlich nur eine Zerteilung der totalen Grenzschicht in mehrere kleinere Grenzschichten nach der Anzahl der Lenktafeln. Die Geschwindigkeit im Luftstrahle beträgt im Falle 1:  $w = 35,5$  m/sec und im Falle 3:  $w = 36,5$  m/sec, angenommen, daß die Motorleistung dieselbe bleibt. Dadurch erhält man einen Energiegewinn von 8% ungefähr, der sonst durch die Bildung der Grenzschicht verlorengeht.

Bock: Der von Herrn Válcovici entworfene Kanal ist u. a. durch eine doppelte Rückführung der Luft gekennzeichnet. Eine ähnliche Luftführung besitzt auch der große Windkanal in Gaidonia, sowie der »Full-scale-Kanal« der NACA. Nun ergeben sich bekanntlich bei derartigen Kanälen leicht dadurch Schwierigkeiten, daß an der Stelle, an der die beiden Rückführungen zusammenlaufen, die Grenzschicht weggeschwemmt wird. Hierbei entsteht meist quer durch die Meßstrecke eine Luftschicht, die eine verringerte Geschwindigkeit und eine erhöhte Turbulenz aufweist. Ich möchte nun fragen, ob Herr Válcovici etwas Ähnliches beobachtet oder welche Mittel er zur Beherrschung dieser Schwierigkeit angewendet hat.

Válcovici: Diese Erscheinung ist uns natürlich bekannt. Wir haben sie dadurch vermieden, daß wir eine ziemlich große Querschnittsfläche bei dem Eintritt der Luft in den Strahl genommen haben. Das Verhältnis des größten Querschnitts zu dem Strahlquerschnitt beträgt nämlich 8:1, so daß die Eintrittsgeschwindigkeit ziemlich klein ausfällt. Dadurch wird die Geschwindigkeitsverminderung in der Mitte stark herab-

ge etat. Eine kleine Geschwindigkeitsveränderung bleibt bestehen, aber die ist unter 1% herunter. Sie ist also vollkommen belanglos, so daß wir eine zweifelhafte Geschwindigkeitsverteilung im Strahlquerschnitt erhalten haben.

Fucke: Ich möchte noch zu den Ausführungen von Herr Valeovic ergänzend sagen, daß bei dem ersten Folke-Wulf-Kanal, den ich gebaut habe, der aber mit Einlochsäufeln versehen war, trotzdem genau dasselbe eintrat, was Herr Valeovic mitgeteilt hat, nämlich an der untern Umlenkecke die große Ablösung. Wir haben sie bekämpft, ganz ähnlich, wie sie in Rumänien bekämpft wurde, nur daß die Abmessungen des Kanals damals sehr kurz waren aus finanziellen Gründen, und da hatten wir nur eine Möglichkeit, nämlich birnenförmige Aufrundung der Ecke. Die hat das Uebel auch sofort beseitigt. Es ist vielleicht ganz interessant, daß also nicht an den einzelnen Schaufeln, wie Herr Valeovic erwähnte, kleinere Grenzschichtablösungen auftraten, sondern nur an der gemauerten Innenecke eine einzelne sehr umfangreiche Störung.